濒危喀斯特专性植物蚬木在中国的潜在适生区预测

韦玉莲[1,2]，王 斌[2]，李冬兴[2]，陆 芳[2]，黄甫昭[2]，李健星[2]，何 凤[2,3]，
向悟生[2*]，陈 婷[2]，李先琨[2]

（1. 广西师范大学 生命科学学院，广西 桂林 541006；2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西 桂林 541006；3. 桂林理工大学 旅游与风景园林学院，广西 桂林 541006）

摘 要：蚬木（*Excentrodendron tonkinensis*）是喀斯特季节性雨林建群种、喀斯特专性树种，属国家Ⅱ级重点保护野生植物、IUCN 濒危植物，具有极高的生态经济价值。但目前对蚬木的潜在适生区在全球变化背景下如何变动及其关键驱动因子仍缺乏了解，影响了蚬木的科学保护和利用。为此，本研究利用最大熵模型（MaxEnt）分析未来气候变化情景（SSP1-2.6 and SSP5-8.5）下蚬木在中国的潜在地理分布变化，并测试了喀斯特地质背景分布对喀斯特专性植物适生区预测的影响。结果表明：（1）在加入喀斯特地质背景数据的情况下，适生区预测模型的 AUC 平均值为 0.997，具有较好的预测效果，模型预测结果严格局限于喀斯特区域，与蚬木喀斯特专性植物的特性相符；（2）根据模型的拟合结果，喀斯特地质背景分布、最暖季降水量（800~950 mm）、最冷月最低温（7~11 ℃）为限制蚬木分布的关键因子；（3）未来随着温度升高，蚬木潜在适生区面积在喀斯特区持续扩张，总体上呈现出向高纬度迁移的趋势；桂西南和滇东南的部分区域存在较大面积的稳定生境。以上研究表明，在预测蚬木等喀斯特专性植物的潜在地理分布时，必须考虑喀斯特地质背景的分布范围；如果未来持续升温，其潜在适生区将向高纬度地区扩张，濒危程度可能受气候变化的影响不明显；桂西南和滇东南部分区域是未来气候变化情景下蚬木保育和利用的适宜区。

关键词：MaxEnt 模型，蚬木，喀斯特专性植物，气候变化

Prediction of potential suitable areas for endangered karst obligate *Excentrodendron tonkinensis* in China

WEI Yulian[1,2], WANG Bin[2], LI Dongxing[2], LU Fang[2], HUANG Fuzhao[2], LI Jianxing[2], HE Feng[2,3], XIANG Wusheng[2*], CHEN Ting[2], LI Xiankun[2]

(1. *College of Life Sciences, Guangxi Normal University*, Guilin 541006, Guangxi, China ; 2. *Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin 541006,Guangxi , China; 3. *College of Tourism and Landscape Architecture, Guilin University of Technology*, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: *Excentrodendron tonkinensis* is a constructive species of karst seasonal rainforest and an obligate karst plant, which is also one of the national secondary key protected wild plant and an IUCN endangered plant, with high economic and ecological value. However, there is still a lack of understanding of how the potential suitable areas of *Excentrodendron tonkinensis* change in the context of global change and its key driving factors, which affect the scientific protection and utilization of *Excentrodendron tonkinensis*.To assess the impacts of climate change on the extents of the habitat of *Excentrodendron tonkinensis*, we used

基金项目：国家重点研发计划（2019YFC0507503）；国家自然科学基金（31760131，31800371）；广西科学院“桂科学者”团队项目（CQZ-D-1903）[Supported by National Key Research and Development Program (2019YFC0507503); National Natural Science Foundation of China (31760131, 31800371) ; Guangxi Academy of Sciences “Gui Science Scholar” Team Project (CQZ-D-1903)]。

第一作者：韦玉莲（1997-），硕士研究生，研究方向为植物生态学，（E-mail）1269514147@qq.com。
***通信作者：**向悟生，研究员，主要从事植物生态学方面的研究，（E-mail）xwusheng@qq.com。

the Maximum-entropy model to analyze the potential changes in the geographical distribution in China of future climate scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5), and tested the influence of the karst geological background distribution on predicting the suitable areas of karst obligate plants. The results show that: (1) in the case of adding karst geological background data, the average AUC of the prediction model for the suitable area is 0.997, which has a good prediction effect. And the model prediction results are strictly limited to the karst region, consistent with the characteristics of *Excentrodendron tonkinensis* which is karst obligate plant; (2) According to the fitting results of the model, the karst geological background, precipitation of warmest quarter(800-950 mm), and the min temperature of coldest month(7-11 ℃) are the key factors limiting the distribution of *Excentrodendron tonkinensis*; (3) with the increase of temperature in the future, the area of potential suitable areas for *Excentrodendron tonkinensis* would expand to higher latitudes karst areas. Large numbers of areas of stable habitats exist in parts of southwest Guangxi and southeastern Yunnan. These results suggest that the karst geological distribution is essential as predicting the potential geographic distribution of karst obligate plants such as *Excentrodendron tonkinensis*; if the temperature continues to rise in the future, its potential suitable areas will expand to high latitudes, and the degree of endangerment may be affected by climate, which means it is not obvious under the influence of climate changes; parts of southwestern Guangxi and southeastern Yunnan are suitable areas for the conservation and utilization of *Excentrodendron tonkinensis* under the climate changes in the future.

Key words: MaxEnt model, *Excentrodendron tonkinensis*, karst obligate plants, climate change

物种的分布受多种环境因子的影响，气候是其中最重要的非生物因子（Brian et al., 2019）。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）正式发布的第六次气候变化评估报告（AR6）表明，1850-1900 年以来，全球地表平均温度已上升约 1℃，未来 20 年的平均温度升高预计达到或超过 1.5 ℃（周天军等，2021）。气候变化会影响植物的维持和分布，尤其对一些濒危或分布范围狭窄的植物而言，全球变暖等气候变化过程会使其原生境无法提供稳定的生存条件（Bennett et al., 2019），进而导致物种改变其地理分布范围以适应新的环境条件。如果无法适应新的环境条件，大量的物种可能会濒临灭绝（Urban, 2015）。因此，预测未来不同气候情景下物种的潜在生境变化及可能的灭绝风险，可以为濒危物种的引种回归、保护措施的制定和可持续利用提供理论依据。

物种分布模型（species distribution models, SDMs）是结合物种的分布点数据和相关环境变量，依据特定的算法推测出该物种的基础生态位（李国庆等，2013）。由于 SDMs 模型无需野外实验数据即可快速预测气候变化下物种的分布范围，其在濒危物种保护中得到广泛应用（Tariq et al., 2021; Guisan et al., 2005)。一系列的方法被提出来用于构建 SDMs 模型，如广义线性模型、广义加性模型、随机森林模型、生物气候模型、最大熵模型等等，此类模型不仅能用于预测物种当前的潜在分布区，而且能预测物种在未来气候变化下的潜在分布格局（Guisan et al., 2002; 李国庆等，2013）。在诸多物种分布模型中，最大熵模型（maximum-entropy, MaxEnt）以其很小的样本量即可获得很高精确度的预测结果并且不受分布信息缺失的约束（应凌霄等，2016），因而成为濒危物种潜在适生区预测的有力工具。

蚬木（*Excentrodendron tonkinensis*）是喀斯特季节性雨林的主要建群种之一（李先琨等，2008），也是广西三大硬木之一，具有重要的生态和经济价值。由于以往有限的保护措施与过度开发利用，导致蚬木野生资源遭到较严重的破坏；而且蚬木雌雄异株，传粉易受阻隔，开花结实周期长且种子产量少，在开花结果年果实中能孕育的种子数仅占 9%，败育的种子高达 89%（高辉等，2006）。因此，蚬木种群数量持续下降，在最新的《国家重点保护野生植物名录》中被列为国家 II 级重点保护野生植物（国家林业和草原局，2021）。蚬木种群的恢复对于喀斯特季节性雨林的稳定维持和生态功能的发挥具有重要意义。蚬木种群恢复的关键环节就是要对其种群的区域环境适应性进行评估，科学预测其生态适宜区，以此找出蚬木种群恢复过程中的限制性环境因素，科学识别种群的适宜恢复区域。现有标本数据和相关研究表明，蚬木在自然状态下严格分布于喀斯特区域（韦毅刚，2018；

苏宗明等，1988；梁畴芬等，1988），是喀斯特专性物种。黄仕训（2001）等研究表明当喀斯特濒危稀有物种迁移至酸性土壤后其叶片形状、种子大小及物候期均出现较明显差异。由于气候与地质背景等因素的影响，使得原喀斯特生境濒危物种无法开花结果完成从种子到种子的世代更替过程。蚬木的抗寒性弱，极端低温将影响幼苗成活率和成树的生长率（广西农学院林学分院林学系等，1978）。因此，当对蚬木进行迁地保护或引种栽培时，需实际掌握蚬木对热量的需要和所能忍受极端低温阈值，同时也需要考虑地理布局显得尤为重要。目前，关于蚬木的研究主要集中在生理生态特征（欧芷阳等，2018；欧芷阳等，2020；欧芷阳等，2017）、营林管理（庞世龙等，2012）、种群动态和群落结构描述（向悟生等，2013；王斌，2012）等方面，但关于蚬木的潜在适宜分布区及其关键的驱动因子等问题仍不清楚。以往采用物种分布模型研究濒危植物如南方红豆杉（*Taxus wallichiana* var. *mairei*）（李艳红等，2021）、天目铁木（*Ostrya rehderiana*）（Tang et al., 2021)、四合木（*Tetraena mongolica*）(段义忠等，2019）、珙桐（*Davidia involucrata*）（王雨生等，2019）、伯乐树（*Bretschneidera sinensis*）（龚维等，2015）等的分布区变化时，大多考虑气候因素和大尺度土壤理化性质的影响。全国土壤普查办公室（1998）研究表明，喀斯特区生境异质性极高，其土壤理化性质在小范围内存在较大的变异性。因此，常用的大尺度土壤理化性质数据在预测蚬木这类喀斯特专性植物时，是否能有效刻画喀斯特独特而复杂的生境特征目前仍缺乏相关研究成果。为此，本研究以蚬木为研究对象，基于最大熵模型（MaxEnt）预测当前及未来 2070s（2061—2080 年）SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种气候情景下的潜在地理分布，在考虑常用大尺度土壤理化性质数据时，测试加入喀斯特地质背景分布数据反映喀斯特综合生境特征的物种分布模型预测结果。本研究拟回答以下问题：（1）限制蚬木分布的关键驱动因子是什么？（2）未来不同气候变化是否会影响蚬木的潜在适生区范围？这些问题的回答将为喀斯特专性植物蚬木的引种、栽培及其可持续管理提供科学依据。

1 数据来源

1.1 蚬木地理数据获取

根据多年的实地调查数据、全球生物多样性信息网络（https://www.gbif.org/）、中国数字植物标本馆（http://www.cvh.org.cn）、中国国家标本资源平台（http://www.nsii.org.cn/）、中国植物图像库（http://ppbc.iplant.cn/）、广西壮族自治区特级保护古树名录和广西壮族自治区一级保护古树名录（http://www.gxzf.gov.cn）获取蚬木地理数据。将具体到村级小地名的地理信息借助百度坐标拾取系统（http://aqsc.shmh.gov.cn/gis/getpoint.htm）来补充其地理坐标，剔除重复错误、信息不明及引种栽培的分布点。为避免集群分布导致模型过拟合，在 ArcGIS10.7 中运用 SDM_Toolbox2.4 插件将所收集数据以 5km 设置缓冲区，缓冲区内随机保留 1 个有效分布点，最终得到 81 个有效分布点，具体分布如图 1 所示。

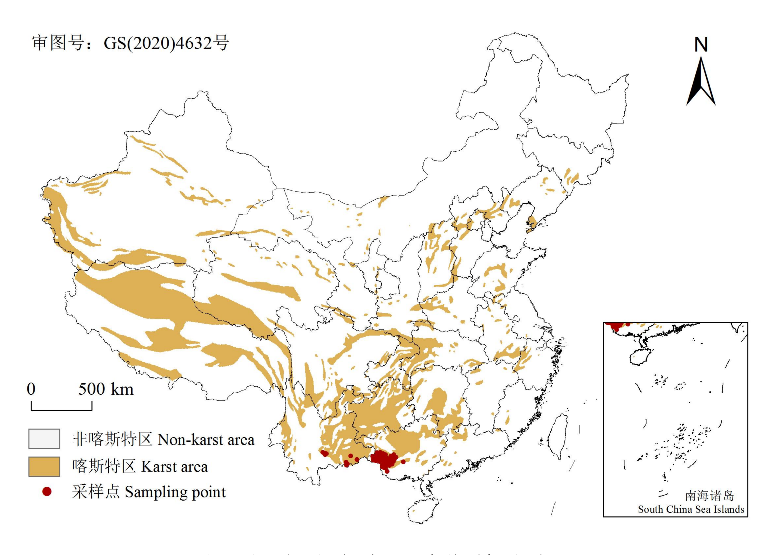


图 1 蚬木分布点及喀斯特分布区

Fig. 1 Distribution points of *Excentrodendron tonkinensis* and karst distribution areas

1.2 环境数据

本研究采用的所有环境数据包含气候因子、地形因子及土壤因子。气候因子（Bio1-Bio19）及地形因子全部来源于世界气候数据网站（https://worldclim.org/）。未来气候数据使用 worldclim v2.1 版本的数据，该数据采用国际耦合模式比较计划第六阶段（CMIP6）的全球气候系统模式模拟未来气候变化。为了分析蚬木分布范围在不同气候情景下的变异情况，分别选择了低排放情景（SSP1-2.6）和高排放情景（SSP5-8.5）进行分析，两者分别对应未来社会的可持续发展路径和常规发展路径（O'Neill et al., 2016）。中国气象局北京气候中心提出的 BCC-CSM2-MR 模式在东亚具有良好的模拟表现（Wu et al., 2014），因此选择 BCC-CSM2-MR 模式数据模拟蚬木在 2070s（2060-2080 年）的分布范围。土壤因子数据来源于联合国粮农组织世界土壤数据库（https://www.fao.org/）；地图数据来源于国家基础地理信息中心（http://www.ngcc.cn/）；土地覆盖数据源于中国科学院地理科学与资源研究所（https://www.resdc.cn/）；喀斯特地质背景分布数据为 1985 年出版的"中国可溶岩类型图"数字化得到（中国地质科学院岩溶地质研究所编，1985）。

所有环境变量使用 ArcGIS 10.7 按照中国为研究区进行掩膜提取，并将掩膜提取后的环境变量转换为 ASCII 格式，分辨率均为 2.5′，地理坐标系统一为 GCS_WGS_1984。

2 研究方法

2.1 环境因子的筛选

为避免环境变量高度相关导致模型多重共线性问题，在 ArcGIS 10.7 中运用 SDM_Toolbox2.4 插件将所有环境因子进行 Pearson 相关性检验，并选择刀切法（jackknife）检验各环境因子的重要性（Yang et al., 2013）。保留相关系数绝对值小于 0.8 的环境因子，当环境变量的相关系数绝对值大于 0.8 时，保留贡献较大的变量。根据前期的数据分析发现，常用的大尺度土壤特征数据较难反映喀斯特区异质性极高且复杂的生境特征，因此尝试将喀斯特地质背景分布数据作为综合的环境因子加入模型分析。经过模型初步拟合，剔除在模型中贡献率为 0 的环境因子，最终选择 17 个无共线性的环境变量进行蚬木潜在适生区预测（表 1）。

2.2 模型拟合与适生区划分

将蚬木地理分布数据和环境变量数据导入 MaxEnt 3.4.4 中进行模型运算。采用 Jackknife 预测各环境变量的贡献率；设置全部样本点的 25%用于验证模型，其余 75%用于训练模型；设置 10 次重复，模型中其余参数选择默认。利用受试者工作特征曲线下的面积 AUC 值进行 MaxEnt 预测精度检测，AUC 取值范围为[0,1]，AUC 值<0.5 表示预测失败，0.5~0.7 表示预测较差，0.7~0.9 表示一般或中等，0.9~1.0 表示优秀（李艳红等，2021）。

将结果文件导入 ArcGIS 10.7 中，采用自然间断点分级法(Jenks)将当前气候情景下蚬木分布适宜度分为 4 个等级：不适生区（0-0.06），低适生区（0.06-0.22），中适生区（0.22-0.43），高适生区（0.43-0.81）（赵光华等，2021），未来气候情景和当前适生等级划分标准一致，均按当前适宜度进行手动划分，获得模型预测的蚬木潜在分布格局。

2.3 未来气候情景潜在适生区与稳定生境分析

在 ArcGIS 10.7 的支持下，通过重叠分析，获取 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种未来气候情景下的高适生区与当前气候条件下高适生区的稳定生境区（Tang et al., 2022）。稳定生境可以为蚬木提供稳定的环境条件，对气候变化情景下物种分布的稳定可能有重要作用，甚至成为气候变化条件下物种的避难所，因此有非常重要的意义（Tang et al., 2022）。最后，为了分析蚬木在未来气候情景下新增适生区的土地利用来源，将扩张区与重新分类后的土地覆盖类型图层进行叠置，计算蚬木 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种未来气候情景下的新增适宜分布区中各种土地覆盖类型所占的比例。

3 结果与分析

3.1 模型精度及模拟当前气候条件适生区

模型的训练 AUC 平均值为 0.997，标准差 ±0.000（图 2），模型拟合达到优秀水平。

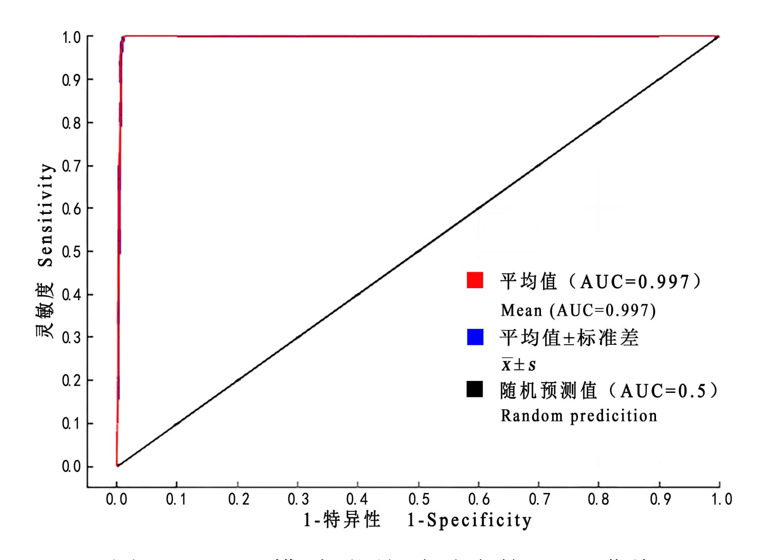


图 2 MaxEnt 模型预测蚬木分布的 ROC 曲线

Fig. 2 The ROC curve of the MaxEnt model to predict the distribution of *Excentrodendron tonkinensis*

模型预测结果表明，当前蚬木适生区严格分布于喀斯特区域，与喀斯特植物专性植物特性相符（图 3），低适生区面积为 3.36 万 km²，中适生区面积为 1.97 万 km²，总适生面积为 6.81 万 km²。高适生区面积为 1.48 万 km² 约占总适生区面积的 22%，主要分布在广西西南部及云东南部喀斯特山地。

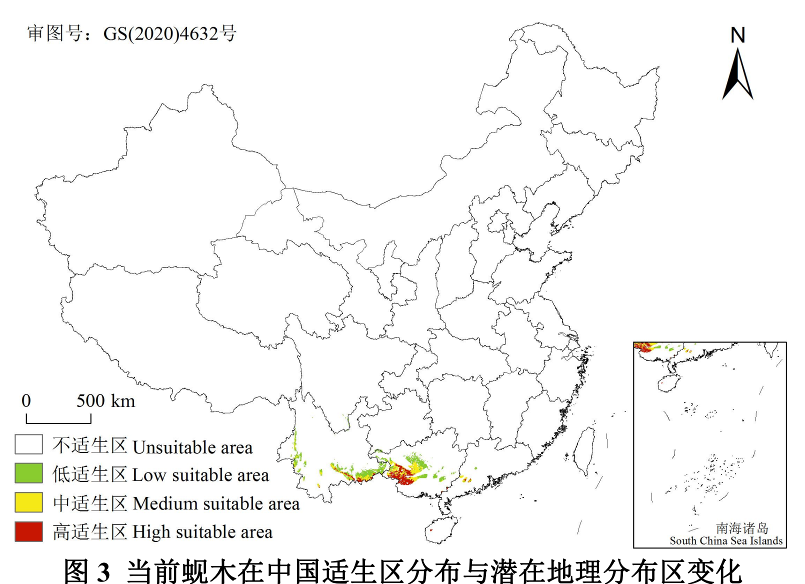


图 3 当前蚬木在中国适生区分布与潜在地理分布区变化

Fig. 3 Current suitable distribution of *Excentrodendron tonkinensis* in China and changes in potential geographical distribution areas

3.2 不同环境因子的贡献及其适应范围

根据模型拟合结果，贡献率最高的环境因子为最暖季度降水量（Bio18）、喀斯特地质背景分布（Karst）和最冷月最低气温（Bio6），贡献率均超过了 10%，其余环境因子贡献率均较小（表 1）。根据环境因子的响应曲线，蚬木适宜的最暖季度降水量区间为 800~950 mm，最冷月最低气温区间为 7~11℃，同时必须为喀斯特地形(图 4)。

表 1 环境因子对蚬木分布的贡献率

Table1 Contribution rate of environmental factors to the distribution of *Excentrodendron tonkinensis*

环境变量 Environmental variable	描述 Description	贡献率 Contribution rate (%)

Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	45.8
Karst	喀斯特地质背景分布 Karst geological background distribution	36.3
Bio6	最冷月最低气温 Min temperature of coldest month	10.0
T_GRAVE	表层土砾石含量 Topsoil gravel content	3.0
Bio3	等温性 Isothermality	1.2
Bio7	温度年较差 Temperature annual range	0.9
Aspect	坡向 Aspect	0.7
Bio8	最湿季度平均气温 Mean temperature of wettest quarter	0.6
ELEV	海拔 Elevation	0.5
T_CACO3	表层土壤碳酸钙 Topsoil calcium carbonate	0.5
T_TEB	表层土壤交换性盐基 Topsoil exchangeable base	0.2
Slope	坡度 Slope	0.2
Bio2	月平均昼夜温差 Mean diurnal range	0.2
T_BS	表层土壤基本饱和度 Topsoil base saturation	0.1
T_SILT	表层淤泥含量 Topsoil silt fraction	0.1
T_PH_H2O	表层土壤 pH Topsoil pH	0.1
Bio15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality	0.1

Bio18. 最暖季度降水量 (mm)；**Karst**. 喀斯特地质背景分布；**Bio6**. 最冷月最低温（℃）。

Bio18. The warmest season precipitation (mm); **Karst**. Karst geological background distribution; **Bio6**. The lowest temperature of the coldest month (℃）.

图 4 主要环境因子的响应曲线

Fig. 4 Response curves of the main environmental factors

3.3 未来不同气候情景下蚬木潜在适生区的变化

在 2070s 的两种气候情景下，蚬木在我国的适生区域均发生了改变(图 5)。与当前气候条件适生区面积相比，SSP1-2.6 情景的高、中、低适生区面积均呈上升趋势(表 2)。在两种升温情景下，蚬木的适宜分布区在原有基础上扩张了 95.17%和 213.80%（图 6）。面积增加最多的区域为广西区，其次为云南省（表 3）。总体而言，未来气候情景下蚬木适生区将整体向高纬度喀斯特区域迁移。

叠置分析结果表明，新增适宜分布区主要位于森林、草地和耕地(表 4)。在两种升温情景下，新增适宜分布区位于林地的比例均最大，比例均超过 49%，其次是耕地和草地，比例均超过 19%。

稳定生境区分析的结果显示，SSP5-8.5 和 SSP1-2.6 两种排放情景与当前气候条件的高适生分布区域基本重叠，面积分别为 1.48 万 km^2 和 1.45 万 km^2(图 6)。

表 2 当前及未来气候情景下蚬木适生区面积

Table 2 The suitable area of *Excentrodendron tonkinensis* under current and future climate scenarios

时期 Period	低适生区 Low suitable Area (10^3 km^2)	中适生区 Moderately suitable area (10^3 km^2)	高适生区 Highly suitable area (10^3 km^2)	总适生区 Total suitable Area (10^3 km^2)
当前 Current	33.6	19.7	14.8	68.1
SSP1-2.6	62.5	24.0	47.9	134.4
SSP5-8.5	92.3	43.3	81.8	217.3

表 3 未来不同气候情景下中国不同省区蚬木适生区面积变化

Table 3 Changes in the area of suitable areas for *Excentrodendron tonkinensis* in different provinces and regions of China under different climates

省份 Province	当前适生区 current suitable area(10^3 km^2)	适生区面积变化 Change in suitable areas (10^3 km^2)		适生区面积变化比例 Change ratio in suitable areas (%)	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
广西 Guangxi	37.53	40.64	48.09	108.29	128.14
云南 Yunnan	27.45	29.97	56.12	109.18	204.44
广东 Guangdong	2.19	0.95	4.13	43.38	188.58
贵州 Guizhou	0.37	9.00	39.30	2 432.43	10 621.62
四川 Sichuan	0.21	0.27	14.87	128.57	7 080.95
海南 Hainan	0.16	0.01	0.01	6.25	6.25
重庆 Chongqing	0.00	0.00	9.72	0.00	-
湖北 Hubei	0.00	0.00	0.78	0.00	-
西藏 Tibet	0.00	0.00	0.38	0.00	-

表 4 不同未来气候情景下蚬木新增适生区来源

Table 4 Sources of newly-increased suitable areas for *Excentrodendron tonkinensis* under different future climate scenarios

土地覆盖类型 Land cover type	新增适生区来源 New source of suitable areas (%)	
	SSP1-2.6	SSP5-8.5
林地 Woodland	56.12	49.97
耕地 Farmland	21.94	26.68
草地 Grassland	19.15	20.05

建设用地 Urban	1.51	1.99
水域 Waters	1.19	1.23
未利用土地 Unused land	0.09	0.08

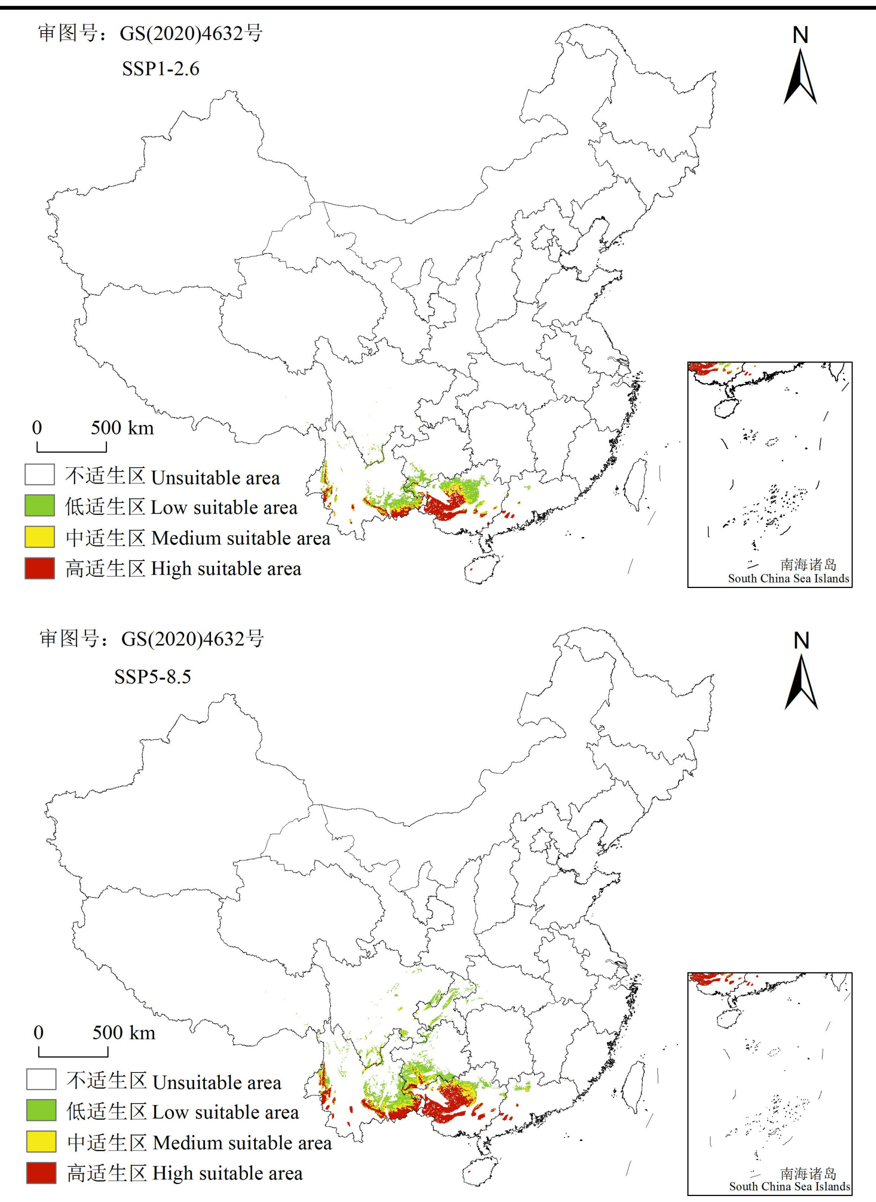
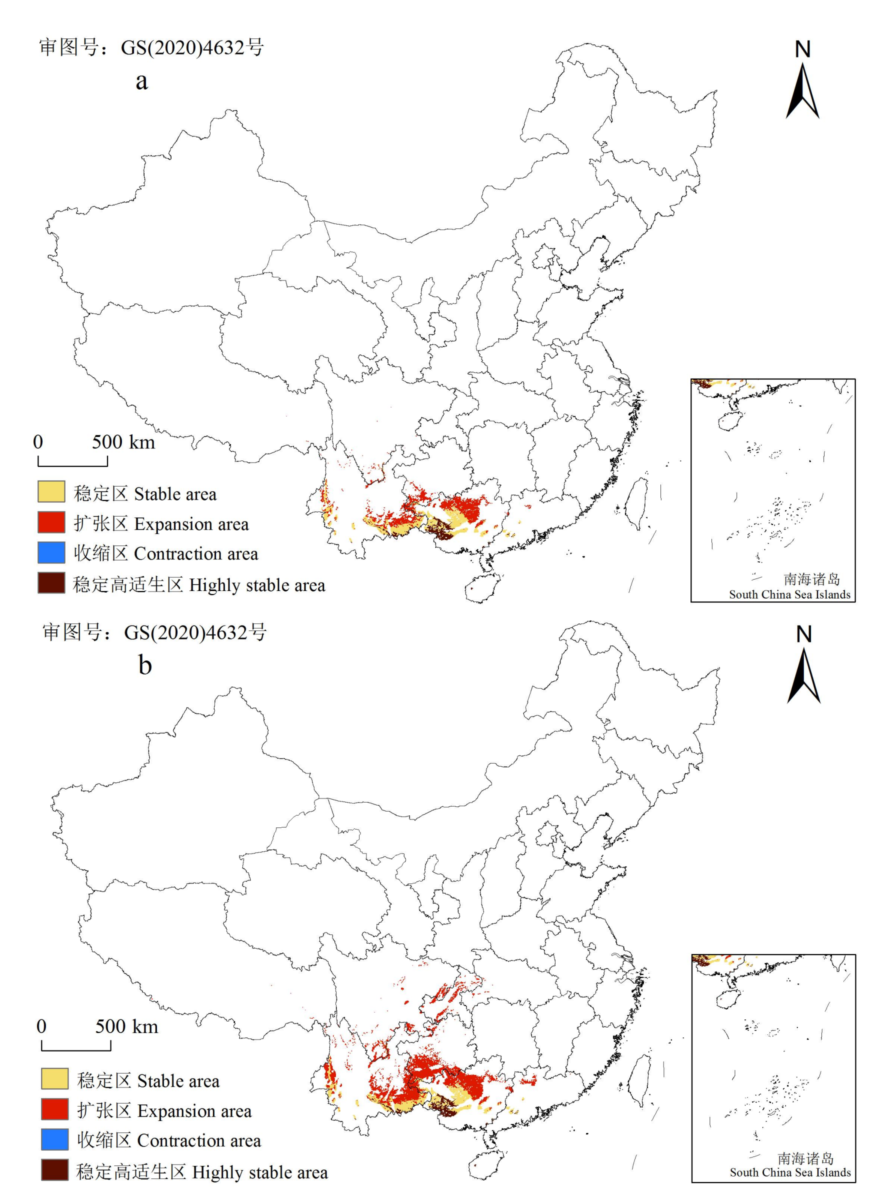


图 5 未来不同气候情景下蚬木在中国的适生区分布

Fig. 5 The suitable distribution of *Excentrodendron tonkinensis* in China under different climate scenarios in the future



a. 当前至 2070s SSP1-2.6 潜在适生区变化 Changes in potential suitable areas for SSP1-2.6 from the present to the 2070s;

b. 当前至 2070s SSP5-8.5 潜在适生区变化 Changes in potential suitable areas for SSP1-2.6 from the present to the 2070s

图 6 当前与未来不同气候情景下蚬木的分布区变化

Fig. 6 Changes in the distribution area of *Excentrodendron tonkinensis* under different climate scenarios at present and in the future

4 讨论

4.1 土壤及喀斯特地质背景分布对蚬木适生区模拟的影响

模型拟合结果表明，喀斯特地质背景分布对喀斯特专性植物适生区的模拟具有重要影响。由于加入喀斯特地质背景分布数据，使得当前和未来时期蚬木的潜在地理分布完全局限于喀斯特区域，与蚬木这种喀斯特专性植物自然状态下只分布于喀斯特地区的特性相符。因此，利用 MaxEnt 模型预测喀斯特专性植物时，必须考虑喀斯特地质背景分布的影响。李先琨、苏宗明等研究表明蚬木在自然情况下仅分布于石灰岩山上，而石灰岩成土过程受母岩的影响，因而，蚬木适生区与喀斯特地形存在极强联系（李先琨等，2008；苏宗明等，1988；广西农学院林学分院林学系等，1978）。蚬木在长期适应喀斯特生态环境过程中，形成了特有的生理生态习性与生长发育特征，对富含钙质的喀斯特生境土壤有极强的适应能力，甚至有一定的依赖性。根据以往研究，蚬木适宜分布的石灰性土壤呈微酸性至微碱性且土壤钙含量丰富（广西农学院林学分院林学系等，1978）。但本研究显示，土壤 pH 值和土壤含钙量的大尺度格局对蚬木的分布贡献很小，其原因可能与单独的土壤理化因子

较难表征喀斯特生境的综合特征有关。现有的研究表明，由于存在复杂的淋溶与富集作用，喀斯特区的土壤 pH 值和含钙量等理化性质变异极大（全国土壤普查办公室，1998），目前常用的 FAO 土壤数据库中的大尺度数据可能难以反映这种复杂变化的特征，而且从全国尺度看，我国北方的盐碱土和黄土高原的黄土均有 pH 值呈碱性和含钙量很高的特征。此外，大尺度模拟时，气候因子的贡献远高于土壤因子的贡献，可能会掩盖土壤因子在局部尺度的作用。张晓玲(2019）等研究也发现，茶树虽然适宜分布在酸性土中，但土壤酸碱度对全球茶树分布区的影响很小。当大尺度范围预测时，气候对模型模拟的贡献值要远高于土壤，而土壤因子的作用或许对较小的局部尺度的预测起到重要作用。

除蚬木为喀斯特专性植物外，我国还有其它许多喀斯特地区特有濒危专性物种，如藤黄科的金丝李、大戟科的肥牛树、东京桐等，这些物种仅见分布于滇黔桂及越南北部的喀斯特区域（梁畴芬等，1988）。已有的研究表明，滇黔桂喀斯特地区分布喀斯特专性植物共有 164 科 654 属 1831 种（于胜祥等，2017；韦毅刚，2018）。说明我国分布有丰富的喀斯特专性植物，且很多喀斯特专性植物是具有重要生态价值和经济价值的濒危物种。本研究结果表明，为了科学保育和利用这些喀斯特专性植物而进行适生区模拟分析时，考虑喀斯特地形分布区范围是准确模拟预测的基础。

4.2 蚬木地理分布的主要气候驱动因素

气候条件是蚬木在纬度地带和垂直地带分布的重要驱动因素之一。模型的预测结果表明，蚬木的分布对最暖月降水和最冷月的最低气温较为敏感。早期的试验观测数据表明，广西境内蚬木分布区的年雨量为 1 100-1 550 mm，最冷月(1 月)平均气温 10.9-13.9℃（广西农学院林学分院林学系等，1978）。模型的预测结果与早期试验观测数据基本吻合。1954 年，研究人员从龙州县引入 3-4 年生的蚬木野生苗在桂林植物园进行栽培，1955 年 1 月受寒潮袭击，幼苗全部死亡；1955 年桂林极端最低气温下达-4.9℃，寒潮当天日平均气温为 2.9℃；在相对气温稍高的南宁栽培的蚬木，14 年生已结实，但纬度更高的桂林引种的 25 年生植株未见开花（广西农学院林学分院林学系等，1978）。以上试验结果均表明蚬木的生长发育对热量具有一定的需求，同时对最冷月的极低温敏感。这些前人的试验研究结果进一步证实了模型预测结果的合理性。

4.3 未来气候变化对蚬木适生区的影响

根据模型的预测结果，未来升温会明显影响蚬木的潜在适生区。未来 SSP5-8.5 情景比 SSP1-2.6 情景的总适生面积增加超过 60%，SSP5-8.5 情景会导致蚬木大面积向高纬度的喀斯特区域迁移。在我国，蚬木主要分布于广西西南部，向西伸展至云南东南部。在广西境内的自然分布范围为 22°05′-24°16′N、105°40′-108°06′E，包括南宁地区的西部，百色地区南部以及河池地区的西南边缘（韦毅刚，2018；广西农学院林学分院林学系等，1978）。未来气候变化下蚬木总适生区主要分布于广西西南及云南东南的喀斯特区域，模型预测结果与蚬木实际分布相似。未来气温升高可能导致部分植物的适生区增加，这种现象在其它濒危植物适生区预测的研究中也经常出现（杨启杰&李睿，2021）。此类情况的出现与植物对热量的需求有关（万广珍等，2021；王绮等，2020；杜志喧等，2021）。蚬木是热带分布的植物种类，对热量具有明显的趋向性，未来 SSP5-8.5 情景下会导致高纬度地区热量增加，而中国高纬度地区分布着大面积的喀斯特区域，蚬木在未来升温的情景下存在向高纬度迁移的可能性和途径。根据适生区来源分析的结果，在未来 SSP5-8.5 情景下新增的适宜分布区中约有 50%的土地覆盖类型是林地，因此未来升温可能不会增加蚬木的濒危程度。但同时应该看到的是，喀斯特是一种非常脆弱的生境，在蚬木现实分布区以北的喀斯特区域大部分不是保护区，存在高强度的人类活动，导致很多区域存在严重的石漠化（张雷等，2011；陈朝军等，2021），而且植物的保育和利用也需要考虑生物的相互作用（如病害、虫害、传粉生物等），因此未来气候变化下，蚬木的分布区是否能北扩仍需开展深入研究。此外，未来气候变化不仅仅表现为气温的升高，同时也表现为极端气候事件发生的频率增加（Harrington et al., 2018），模型拟合的结果显示了蚬木对最冷月极低温的敏感性，如果未来较频繁的发生如 2008 年的极端低温事件（陈洪滨等，2008），可能也会严重影响蚬木的种群更新和数量。

4.4 潜在分布区土地转化的可能性及未来适生区科学评估

由于数据所限，本研究在预测未来气候变化下蚬木的潜在适生区分布未考虑极端气候事件的影

响，未来随着全球温度的升高，极端气候事件发生的频次可能越来越高，会对蚬木的适生生境产生影响；本研究中也未考虑局部小生境的影响，喀斯特地形在极小的范围会发生急剧变化，小地形变化如何影响蚬木分布的研究不多，蚬木适生的小生境生态位也并未明确；本研究在模型拟合过程中只考虑地形、土壤、气候、降水的影响，未考虑与生物之间关系和人为活动的影响；由于物种分布模型主要考虑气候和土壤等物理因子的作用，较少考虑生物相互作用和扩散作用，易高估物种的适生区，这些因素可能会导致研究结果产生不确定性。因此，下一步可结合此类问题开展进一步研究，为蚬木的有效保护和利用提供更精确的预测结果。

在未来气候变化情景下，高纬度新增适生区是否适合开展蚬木的人工培育及迁地保护仍需开展深入研究。为了减少不确定性，在进行人工培育和迁地保护时，可考虑选择在蚬木当前和未来气候情景均高适生的稳定生境内为宜。结合图 6 分析，在我国广西西南部及云南东南部的喀斯特地区建立蚬木人工培育基地较好。

参考文献：

BRIAN O, STEPHAN B, CLAUDIA R, et al., 2019. Monitoring global changes in biodiversity and climate is more important than ever as ecological crisis intensifies[J]. Ecol Inform, 55(1): 101033.

BENNETT S, DUARTE CM, MARBA N, et al., 2019. Integrating within-species variation in thermal physiology into climate change ecology[J]. Philos T R Soc B, 374(1778): 20180550.

Department of forestry, forestry branch, guangxi agricultural college, department of ecology, institute of botany, chinese academy of sciences, Guangxi institute of botany, 1978. Ecology and forest management of *Excentrodendron hsienmu*. Compiled by ecology office, institute of botany, chinese academy of sciences. Plant ecology research report collection (episode 1)[C]. Beijing: Science Press: 8-24. [广西农学院林学分院林学系，中国科学院植物研究所生态室，广西植物研究所，1978. 蚬木的生态与营林问题.中国科学院植物研究所生态室编.植物生态学研究报告集·（第一集）[C]. 北京：科学出版社：8-24.]

CHEN CJ, YUAN DX, CHEN H, et al., 2021. Human activities and climate change have triggered rocky deserts in southwest china expansion of chemicalization[J]. Sci Chin Earth Sci, 51(11): 1950-1963. [陈朝军，袁道先，程海，等，2021. 人类活动和气候变化触发了中国西南石漠化的扩张[J]. 中国科学：地球科学，51(11): 1950-1963.]

CHEN HB, FAN XH, 2009. Some extreme events of weather climate and related phenomena in 2008[J]. Clim Environ Res, 14(3): 329-340. [陈洪滨，范学花，2009. 2008 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾[J]. 气候与环境研究，14(3): 329-340.]

DUAN YZ, YU H, WANG HT, et al., 2019. Geographical distribution and prediction of potentially suitable regions of endangered relict plant *Tetraena mongolica*[J]. Plant Sci J, 37(3): 337-347. [段义忠，鱼慧，王海涛，等，2019. 孑遗濒危植物四合木(*Tetraena mongolica*)的地理分布与潜在适生区预测[J]. 植物科学学报，37(3): 337-347.]

DU ZX, SU QT, ZHOU B, et al., 2021. Potential distribution of invasive species *Bidens frondosa* under different climate change scenarios in China[J]. Chin J Ecol, 40(8): 2575-2582. [杜志喧，苏启陶，周兵，等，2021. 不同气候变化情景下入侵植物大狼把草在中国的潜在分布[J]. 生态学杂志，40(8): 2575-2582.]

GUISAN A, THUILLER W, 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models[J]. Ecol Lett, 8(1): 933-1009.

GUISAN A, EDWARDS TC, HASTIE T, 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene[J]. Ecol Model, 157(2-3): 89-100.

GONG W, XIA Q, CHEN HF, et al., 2015. Prediction of potential distributions of *Bretschneidera sinensis*, an rare and endangered plant species in China[J]. J S Chin Agric Univ, 36(4): 98-104. [龚维，夏青，陈红锋，等，2015. 珍稀濒危植物伯乐树的潜在适生区预测[J]. 华南农业大学学报，36(4): 98-104.]

GAN H, TANG Y, ZHANG LY, 2006. Megasporogenesis and embryo sac development in *Excentrodendron*

hsienmu (malvaceae) with reference to the systematic affinities of *Excentrodendron*[J]. J Systevot, 44(5): 538-550. [高辉，唐亚，张立芸，2006. 蚬木的大孢子发生与胚囊发育兼论蚬木属的系统亲缘[J]. 植物分类学报，44(5): 538-550.]

HARRINGTON LJ, OTTOF E, 2018. Adapting attribution science to the climate extremes of tomorrow[J]. Environ Res Lett, 13(12): 123006-123006.

HUANG SX, LI RT, LUO WH, et al., 2001. Variation in characteristics of rare and threatened plants after ex-situ conservation[J]. Biodiversity Sci, 9(4): 359-365. [黄仕训，李端棠，骆文华，等，2001. 石山稀有濒危植物在迁地保护后的性状变异[J]. 生物多样性，9(4): 359-365.]

LI GQ, LIU CC, LIU YG, et al., 2013. Advances in theoretical issues of species distribution models[J]. Acta Ecol Sin, 33(16): 4827-4835. [李国庆，刘长成，刘玉国，等，2013. 物种分布模型理论研究进展[J]. 生态学报，33(16): 4827-4835.]

LI XK, JIANG ZC, HUANG YQ, et al., 2008. Dynamics of dominant population and its influence on karstification in southwest Guangxi, China[J]. Acta Geosci Sin, 29(2): 253-259. [李先琨，蒋忠诚，黄玉清，等，2008. 桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响[J]. 地球学报，29(2): 253-259.]

LIANG CF, LIANG JY, LIU LF, et al., 1988. Report on comprehensive survey of longgang reserve, Guangxi[J]. Guihaia, (Suppl. 1): 83-184. [梁畴芬，梁健英，刘兰芳，等，1988. 弄岗自然保护区植物区系考察报告[J]. 广西植物，(增刊 1): 83-184.]

LI YH, ZhANG LJ, ZHU WB, et al., 2021. Geographical distribution changes of *Taxus wallichiana* var. *mairei* in the background of global change[J]. J Nat Resour, 36(3): 783-792. [李艳红，张立娟，朱文博，等，2021. 全球变化背景下南方红豆杉地域分布变化[J]. 自然资源学报，36(3): 783-792.]

Institute of karst geology, Chinese academy of geologcal sciences, 1985. Explanation of the map of Solublerock types in China[M]. Beijing: Cartographic Publishing House:1-38. [中国地质科学院岩溶地质研究所编，1985. 中国可溶岩类型图说明书[M]. 北京：地图出版社：1- 38.]

National soil census office, 1998. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press: 135-762. [全国土壤普查办公室，1998. 中国土壤[M]. 北京：中国农业出版社：135-762.]

OU ZY, CAO YY, TAN CQ, et al., 2018. 64 zEffects of drought on photosynthesis and resistance physiology of *Excentrodendron hsienmu* seedlings in karst habitat[J]. Chin J Ecol, 2018, 37(11): 3270-3276. [欧芷阳，曹艳云，谭长强，等，2018. 干旱胁迫对喀斯特生境蚬木幼苗光合特性及抗性生理的影响[J]. 生态学杂志，37(11): 3270-3276.]

OU ZY, PANG SL, HE F, et al., 2020. Responses of *Excentrodendron hsienmu* leaf traits to Micro-topographical changes in karst moutains of southwest guangxi, China[J]. SW Chin J Agric Sci, 33(10): 2225-2231. [欧芷阳，庞世龙，何峰，等，2020. 桂西南喀斯特山地蚬木叶片性状对微地形变化的响应[J]. 西南农业学报，33(10): 2225-2231.]

OU ZY, PANG SL, TAN CQ, et al., 2017. Effects of forest structure on natural regeneration of *Excentrodendron hsienmu* population in southwest Guangxi, China[J]. Chin J Appl Ecol, 2017, 28(10): 3181-3188. [欧芷阳，庞世龙，谭长强，等，2017. 林分结构对桂西南蚬木种群天然更新的影响[J]. 应用生态学报，28(10): 3181-3188.]

O'NEILL BC, TEBALD C, VUUREN DP, et al., 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. Geosci Model Dev, 9(9): 3461-3482.

PANG SL, LIU X, LIU SY, et al., 2012. The distribution status and main cultivation techniques of *Excentrodendron hsienmu* in Longgang National Nature Reserve, Guangxi[J]. J Food Sci, 11(10): 63-64. [庞世龙，刘秀，刘晟源，等，2012. 广西弄岗国家级自然保护区蚬木资源分布现状及主要栽培技术探讨[J]. 林业实用技术，11(10): 63-64.]

Nationai forestry and grassland administration, ministry of agriculture and rural affaire, Decree No. 15, 2021. List of wild plants under state protection[EB/OL]. http: //www. forestry. gov. cn/. [国家林业和

草原局农村和农业部，2021 年第 15 号公告. 国家重点保护野生植物名录[EB/OL]. http: //www. forestry. gov. cn/.]

SU ZM, ZHAO TL, HUANG QC, 1988. Report on comprehensive survey of longgang reserve, Guangxi[J]. Guihaia, (Supplement 1): 185-214. [苏宗明，赵天林，黄庆昌，1988. 弄岗自然保护区植被调查报告[J]. 广西植物，(增刊 1): 185-214.]

TARIQ M, NANDI SK, BHATT I D, et al., 2021. Phytosociological and niche distribution study of *Paris polyphylla* smith, an important medicinal herb of indian himalayan region[J]. Trop Ecol, 62(2): 163-173.

TANG SL, SONG YB, ZENG B, et al., 2022. Potential distribution of the extremely endangered species *Ostrya rehderiana* (betulaceae) in China under future climate change [J]. Environ Sci Poll Res, 29(1): 7782-7792.

URBAN MC, 2015. Accele rating extinction risk from climate change[J]. Science, 348(6234): 571-573.

WEI YG, 2018, The distribution and conservation status of native plants in guangxi, China [M]. China Forestry Publishing House: 206-214. [韦毅刚，2018. 广西本土植物及其濒危状况[M]. 北京：中国林业出版社：206-214.]

WANG B, 2012. Ecological research on *Excentrodendron hsienmu* community in the northern tropical karst seasonal rainforest [D]. Guilin: Guangxi Normal University:7-45. [王斌，2012. 北热带喀斯特季节性雨林蚬木群落生态学研究[D]. 桂林：广西师范大学：7-45.]

WANG YS, WANG ZH, XING HF, et al., 2019. Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involucrata* baill in China based on MaxEnt [J]. Chin J Ecol, 38(4): 1230-1237. [王雨生，王召海，邢汉发，等，2019. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测[J]. 生态学杂志，38(04): 1230-1237.]

WU TW, SONG LC, LI WP, et al., 2014. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies[J]. J Meteorol Res-Prc, 28(1): 34-65.

WAN GZ, SHEN L, GUO YX, et al., 2021. Potential geographical distribution of *Forsythia suspensa* (thunb.) vahl under climate change based on maximum entropy model[J]. Chin J Inf Tradit Chin Med, 28(12): 1-6. [万广珍，申亮，郭延秀，等，2021. 基于最大熵模型预测未来气候变化背景下连翘的潜在地理分布[J]. 中国中医药信息杂志，28(12): 1-6.]

WANG Q, FAN BG, ZHAO GH, 2020. Prediction of potential distribution area of *Corylus mandshurica* in China under climate change[J]. Chin J Ecol, 39(11): 3774-3784. [王绮，樊保国，赵光华，2020. 气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测[J]. 生态学杂志，39(11): 3774-3784.]

XIANG WS, WANG B, DING T, et al., 2013. Age structure and quantitative dynamics of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest in south China[J]. Chin J Ecol, 32(4): 825-831. [向悟生，王斌，丁涛，等，2013. 喀斯特季节性雨林蚬木种群结构和数量动态[J]. 生态学杂志，32(4): 825-831.]

XIANG WS, NONG CG, WANG B, et al., 2013. Growth models of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest[J]. Guihaia, 33(3): 285-290. [向悟生，农重刚，王斌，等，2013. 喀斯特季节性雨林蚬木种群的增长模型[J]. 广西植物，33(3): 285-290.]

YANG XQ, KUSHWAHA SYS, SARAN S, et al., 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, justicia adhatoda l. in lesser himalayan foothills[J]. Ecol Eng, 51(1): 83-87.

YU SX, XU WB, WU JY, et al., 2017. Spermatophytae of karst area in Guangxi, Yunnan and Guizhou — a checklist [M]. Beijing: China Environmental Science Press: 135-142. [于胜祥，许为斌，武建勇，等，2017. 滇黔桂喀斯特地区种子植物名录[M]. 北京：中国环境出版社：135-142.]

YANG QJ, LI R, 2021. Predicting the potential suitable habitats of *Alsophila spinulosa* and their changes[J].

Chin J Appl Ecol, 32(2): 538-548. [杨启杰，李睿，2021. 桫椤的潜在适生区及其变化[J]. 应用生态学报，32(2): 538-548.]

YING LX, LIU Y, CHEN ST, et al., 2016. Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model[J]. Biodiversity Sci, 24(4): 453-461. [应凌霄，刘晔，陈绍田，等，2016. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟[J]. 生物多样性，24(4): 453-461.]

ZHOU TJ, CHEN ZM, CHEN XL, et al., 2021. Interpreting IPCC AR6: future global climate based on projection under scenarios and on near-term information [J]. Clim Change Res, 17(6):652-663. [周天军，陈梓明，陈晓龙，等，2021. IPCC AR6 解读：未来的全球气候—基于情景的预估和近期信息[J]. 气候变化研究进展. 17(6): 652-663.]

ZHAO GH, CUI XY, WANG Z, et al., 2021. Prediction of potential distribution of *Ziziphus jujuba* var.*spinosa* in China under context of climate change [J]. Sci Silv Sin, 57(6): 158-168. [赵光华，崔馨月，王智，等，2021. 气候变化背景下我国酸枣潜在适生区预测[J]. 林业科学，57(6): 158-168.]

ZHANG XL, LI YC, WANG YY, et al., 2019. Influence of future climate change in suitable habitats of tea in different countries[J]. Biodiversity Sci, 27(06): 595-606. [张晓玲，李亦超，王芸芸，等，2019. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响[J]. 生物多样性，27(6): 595-606.]

ZHANG L, LIU SR, SUN PS, et al., 2011. Comparative evaluation of multiple models of the effects of climate change on the potential distribution of *Pinus massoniana*[J]. Chin J Plant Ecol, 35(11): 1091-1105. [张雷，刘世荣，孙鹏森，等，2011. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较[J]. 植物生态学报，35(11): 1091-1105.]

附录

81 个有效分布点的环境数据

Environmental variable for 81 valid distribution points

编号 Number	lon	lat	Bio18	Karst	Bio6	T_GRAVE	Bio3
1	106.289	23.161	850	1	8.11	19	34.91
2	106.546	22.962	891	1	9.01	16	34.27
3	106.433	23.144	866	1	8.44	16	33.90
4	106.039	23.077	861	1	7.71	19	36.19
5	106.026	23.264	814	1	7.51	14	36.25
6	106.358	23.633	771	1	7.77	16	35.56
7	106.827	22.674	785	1	10.00	19	34.54
8	106.991	22.575	749	1	10.16	18	34.75
9	107.096	22.899	806	1	9.36	24	33.29
10	107.096	22.979	816	1	9.09	19	33.27
11	107.581	23.328	811	1	9.53	24	32.83
12	107.738	23.131	805	1	9.52	18	33.26
13	107.551	23.134	814	1	9.40	26	32.26
14	107.645	23.151	799	1	9.57	24	32.31
15	106.615	23.657	764	1	8.73	20	35.12
16	106.543	23.215	857	1	7.97	10	33.32
17	106.821	22.611	779	1	9.94	19	34.92
18	106.829	22.826	805	1	9.76	19	33.90
19	106.765	22.912	826	1	9.57	25	33.77
20	107.347	22.997	821	1	8.90	19	32.30
21	106.919	22.816	825	1	9.38	19	33.17
22	107.022	23.290	804	1	9.03	27	33.60
23	106.896	22.878	832	1	9.21	19	33.49
24	107.371	23.134	821	1	8.89	19	32.03
25	106.805	23.066	840	1	8.91	17	33.67
26	106.107	23.235	827	1	7.64	19	35.70
27	106.234	23.262	830	1	7.79	19	35.57
28	106.232	23.405	799	1	7.69	19	35.26

29	106.761	22.666	804	1	9.77	19	34.42
30	106.990	22.511	727	1	10.34	16	35.07
31	106.848	22.775	795	1	9.90	19	33.84
32	107.303	23.062	820	1	8.96	19	32.37
33	107.336	22.947	816	1	8.96	20	32.75
34	107.292	23.143	814	1	8.91	19	32.82
35	106.857	22.946	862	1	8.73	12	32.79
36	107.042	22.902	825	1	9.05	22	33.09
37	107.181	23.022	817	1	9.01	19	33.51
38	107.698	23.466	820	1	8.73	19	32.08
39	107.443	23.338	808	1	9.68	21	33.36
40	107.506	23.297	812	1	9.76	23	33.42
41	107.602	23.385	820	1	8.82	15	32.62
42	106.269	23.018	896	1	7.82	16	34.47
43	106.059	23.178	840	1	7.46	19	35.66
44	107.317	22.653	789	1	9.93	19	34.15
45	107.130	23.207	824	1	8.65	19	33.40
46	103.898	22.705	813	1	10.73	10	41.30
47	107.857	23.260	830	1	8.20	19	30.97
48	106.713	22.967	833	1	9.42	14	33.99
49	106.837	23.561	797	1	8.38	19	33.58
50	107.477	23.195	819	1	9.04	25	32.18
51	108.419	22.899	684	1	8.73	12	31.33
52	106.393	23.083	875	1	8.58	17	33.93
53	107.243	22.863	799	1	9.48	19	33.50
54	107.525	22.753	804	1	9.51	16	33.29
55	104.725	23.136	886	1	5.71	10	41.06
56	101.993	23.617	742	1	9.34	12	49.36
57	107.069	22.835	807	1	9.28	20	33.28
58	107.723	23.185	806	1	9.37	28	32.38
59	106.588	23.337	828	1	8.46	11	34.26
60	104.230	23.394	770	1	4.91	18	44.25
61	106.599	23.021	890	1	8.45	17	33.51
62	107.157	23.092	820	1	8.96	19	33.38
63	107.635	22.957	803	1	9.43	19	31.45
64	102.184	23.474	693	1	8.01	7	49.55
65	102.293	23.546	635	1	5.85	10	49.01
66	102.117	23.575	643	1	6.60	26	48.88
67	103.970	22.814	949	1	6.82	15	41.69
68	103.860	22.927	799	1	9.59	10	42.72
69	107.020	22.480	726	1	10.37	19	34.81
70	107.146	22.227	747	1	10.34	28	35.44
71	106.620	23.392	819	1	8.04	19	34.07
72	106.741	22.550	778	1	9.80	19	35.37
73	106.854	22.509	746	1	10.05	19	34.64
74	106.788	22.565	789	1	9.69	18	35.16

75	106.789	23.268	807	1	9.13	19	34.00
76	106.136	23.353	802	1	7.56	19	35.39
77	106.006	23.382	783	1	8.04	17	37.02
78	107.223	22.748	788	1	9.84	15	33.57
79	106.548	23.540	803	1	7.30	19	34.58
80	106.774	22.676	804	1	9.77	19	34.42
81	107.007	23.474	791	1	9.55	19	33.31

注：基于保护目的，将 81 个有效分布点经纬度信息进行适当的模糊处理，仅出示分布点的小数点后 3 位信息。